

COMPARATIVO DA TAXA GEOMÉTRICA DE ARMADURA DE PILARES DE CONCRETO ARMADO COM SEÇÃO RETANGULAR UTILIZANDO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA POR MEIO DE ENVOLTÓRIAS DE MOMENTOS

GEOMETRIC RATE COMPARISON OF COLUMNS REINFORCEMENTS OF REINFORCED CONCRETE WITH RECTANGULAR SECTION USING HIGH-STRENGTH CONCRETE THROUGH ENVELOPMENT OF MOMENTS

Ednayane Ingrid Silva Costa¹

Izana Alves de Oliveira Queiroz²

Vinicius Slompo Pinto³

Bebedouro – SP, 2020

RESUMO

Este artigo tem como objetivo realizar o comparativo da taxa geométrica de armadura de pilares de concreto armado com concreto de alta resistência (grupo II) por meio de envoltórias de momentos, modificando as características iniciais do pilar, como resistência do concreto e a força normal solicitante de cálculo. Para o procedimento de análise dos dimensionamentos dos pilares, feito de acordo com ABNT NBR 6118:2014, foi utilizado o programa *Microsoft Excel* facilitando o processo de cálculo gerando planilhas e representações gráficas. Os resultados indicaram que o método pilar-padrão com rigidez κ aproximada apresenta ser mais eficiente para o cálculo de armadura que o método pilar-padrão com curvatura aproximada. Constatou-se que os concretos de alta resistência necessitam de baixa área de aço, se mostrando eficaz para uso em pilares.

Palavras-chave: Dimensionamento. Força normal. Concreto de alta resistência.

ABSTRACT

This article aims to compare the geometric rate of the columns of reinforced concrete columns with high-strength concrete (group II) through envelopment of moments, modifying the initial characteristics of the column, such as concrete resistance and the normal force calculation. For the analysis procedure of the design of the columns, made following ABNT NBR 6118: 2014 using the Microsoft Excel program to facilitate the calculation process, generating spreadsheets and graphical representations. The results indicated that the standard column method with approximate stiffness κ is more efficient for reinforcement calculations than the standard column method with approximate curvature. It was found that high-strength concretes require a low steel area, proving to be effective for use in columns.

Keywords: Design. Normal force. High-strength concretes

¹ Graduanda em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: ednayaneingrid@gmail.com.

² Graduanda em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: izanaqueiroz6@gmail.com

³ Professor Mestre no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: vinicius.slompo.p@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A área da construção civil apresenta avanços tecnológicos significantes em relação à constituição dos materiais do concreto, dentre esses avanços cita-se o concreto de alta resistência (CAR). Este concreto surgiu, pois, há um crescimento nas exigências quanto ao desempenho estrutural, sendo que o CAR possibilita uma diminuição no consumo de energia destinada à obra. Essa diminuição de energia ocorre devido sua simplicidade de execução e lançamento nas fôrmas. Assim, a utilização do CAR é crescente, principalmente em estruturas de grande porte como, plataformas marítimas, grandes edificações e pontes (ALVES, 2000).

O CAR foi desenvolvido na década de 70. Em sua constituição são adicionados superplastificantes e sílica ativa, ambos com capacidade de aumentar a resistência à compressão pela alteração da microestrutura do material (JACOMASSI, 2008).

A ABNT NBR 8953:2015 divide os concretos em duas classes de acordo com a resistência característica à compressão (f_{ck}): grupo I (C20 até C50) e grupo II (C55 até C100), de forma que os CAR se enquadram no segundo grupo. A principal característica dos concretos do grupo II são as maiores resistências finais e iniciais. Para adquirir uma maior resistência inicial, em concretos de alta resistência, deve-se utilizar cimentos puros, ou com pequenos teores de adições (ALVES, 2000).

Os pilares são definidos como elementos lineares de eixo reto, feitos na vertical, nos quais as forças normais de compressão são preponderantes (ABNT NBR 6118:2014). Os pilares são peças de extrema importância em uma edificação, pois, no arranjo estrutural, é função do pilar transmitir as ações atuantes para a fundação (NASCIMENTO, 2009).

Atualmente, existem *softwares* próprios para dimensionamentos em geral. Esses *softwares* possuem a capacidade de reduzir o tempo de cálculo e utilizam processos numérico refinados. Porém existem os métodos tradicionais de dimensionamento de pilar, no qual são utilizados ábacos. Esses ábacos foram desenvolvidos para condições que já existem, ou seja, condições pré-estabelecidas (ALVES, 2013).

Uma alternativa prática e de fácil uso para dimensionar pilares que permitem conseguir resultados com boa eficiência são os ábacos, de forma que eles se tornam uma alternativa viável para o dimensionamento (PINHEIRO; BARALDI; POREM, 2009).

Para o dimensionamento de pilares existem métodos aproximados, como o Método do pilar-padrão com curvatura aproximada e Método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada. O dimensionamento de armaduras longitudinais utiliza um conjunto de esforços resistentes que compõem as envoltórias, e esforços solicitantes que precisam ser englobados por elas. Essas envoltórias são determinadas de acordo com a análise da estrutura (ABNT NBR 6118:2014).

Este trabalho tem como objetivo realizar o comparativo da taxa geométrica de armadura de pilares de concreto armado utilizando concreto de alta resistência (grupo II) por meio de envoltórias de momentos, modificando as características iniciais do pilar, como resistência do concreto e a força normal solicitante de cálculo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto de alta resistência (CAR)

Com o crescimento das pesquisas e tecnologias relacionadas ao concreto, houve melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade. A partir dessas melhorias, surgiu o concreto de alta resistência (CAR). A utilização do CAR teve um aumento considerável devido as vantagens que ele pode proporcionar na aplicação em estruturas (RAMOS, 2001).

Algumas vantagens obtidas com o uso do CAR, são: estruturas mais esbeltas, vãos livres maiores, aumento da área útil dos pavimentos, redução do peso próprio das estruturas, menor quantidade de material e maior durabilidade (JACOMASSI, 2008). Além das vantagens existem também algumas desvantagens, o CAR exige uma mão de obra qualificada e grande conhecimento técnico do comportamento deste material, pois é necessário um controle e vigilância durante sua produção e execução na obra. O CAR é um material que precisa de aditivos e materiais de alta qualidade, fatores que colaboram para que o metro cúbico do CAR tenha maior custo (ALVES, 2000).

A utilização mais usual desse concreto é em pilares de grandes edificações, pois, ele possibilita a redução da seção transversal, auxiliando na redução do consumo do concreto e de armadura de aço (PAIVA, 1994).

O CAR proporciona altas resistências mecânicas, como a resistência à compressão, alcançando valores próximos a 100 MPa. Além dessa vantagem,

existem outras características como a durabilidade. O CAR é um concreto com pouca porosidade e sua microestrutura é mais densa, o que resulta em um acréscimo da durabilidade dos componentes estruturais (QUEIROGA, 1999).

O aumento da resistência está associado a uma baixa relação água/cimento. Porém, para que se consiga uma boa trabalhabilidade, é necessário que adicione aditivos superplastificantes, que possuem alto poder de redução de água, sendo possível atingir até 30% de redução do teor de água (PAIVA, 1994).

2.2 Pilares

Os pilares são definidos como componente estruturais de eixo reto, no qual os esforços normais de compressão são preponderantes e comumente são dispostos na vertical. Possuem a principal finalidade de receber a carga resultantes das vigas e lajes e transmiti-las até a fundação. Possuem ainda uma importante função no que se refere à estabilidade global do edifício, contribuindo na absorção de esforços horizontais (LIMA, 2001).

Em um edifício usual, que tenha múltiplos pavimentos, o pilar apresenta algumas funções no desempenho da estrutura, essas funções são (KIMURA, 2010):

- a) Suportar às solicitações resultantes das ações verticais da estrutura conduzindo-as para a fundação;
- b) Suportar às solicitações resultantes das ações horizontais no arranjo estrutural;
- c) Auxiliar na manutenção da estabilidade global da edificação.

Os pórticos são formados pelo conjunto viga-pilar. Eles possuem a função de resistir às ações verticais e horizontais. Com os pórticos é possível manter a estabilidade global da estrutura (SCADELAI; PINHEIRO, 2007).

2.3 Efeitos de 2ª ordem

A análise do equilíbrio de uma estrutura em 1ª ordem é realizada quando essa estrutura é analisada em sua posição indeformada, ou seja, na sua posição geométrica inicial. Entretanto, essa avaliação não considera os esforços adicionais que surgem devidos aos deslocamentos horizontais dos nós (extremidades de cada barra) da estrutura e a carga vertical pré-existente. Dessa maneira é necessário

considerar a posição deformada, ou seja, efetuar uma verificação de segunda ordem (LIMA, 2001).

A ocorrência dos efeitos de segunda ordem é considerada quando a verificação do equilíbrio realizada passa a considerar a estrutura na sua posição deslocada. Está subentendido que nessa definição os deslocamentos prejudicam o equilíbrio da estrutura. No entanto, essa análise pode ser feita em pequenos deslocamentos ou grandes deslocamentos (SILVA, 2004). Os efeitos de segunda ordem são caracterizados por dois tipos: efeitos globais e efeitos locais. Os efeitos globais resultam dos deslocamentos relativos das extremidades dos elementos, e os efeitos locais resultam das deformações ao longo do comprimento do elemento (OLIVEIRA, 2013).

2.4 Imperfeições geométricas locais: momento mínimo

A ABNT NBR 6118:2014 determina um ângulo de inclinação θ_1 (ângulo criado para avaliar o efeito da falta de retineidade ou desaprumo do pilar), e este ângulo permite modelar os efeitos das imperfeições geométricas locais, ao se criar uma excentricidade acidental. Segundo a ABNT NBR 6118:2014 esses efeitos podem ser substituídos pelo momento mínimo. Assim, existem dois métodos para modelar os efeitos das imperfeições geométricas locais: a excentricidade acidental e o momento mínimo, porém o mais utilizado atualmente, para determinar os efeitos das imperfeições locais, é o momento mínimo (PINTO, 2017).

Para o dimensionamento de um pilar deve ser considerado um valor mínimo de momento fletor que está aplicado na peça, e esse valor mínimo é definido como momento mínimo (PINTO, 2017). O momento mínimo deve ser considerado de forma separada em todas as direções principais, no pilar submetido à flexão composta oblíqua (SCADELAI; PINHEIRO, 2007).

2.5 Classificação quanto à esbeltez

Os efeitos de 2ª ordem ganham importância com aumento da esbeltez. Há um aumento dos esforços solicitantes com o aumento da esbeltez por causa dos deslocamentos, causando um acréscimo de risco de instabilidade do arranjo estrutural ou até levando seu colapso (SCADELAI, 2004).

A partir da análise teórica de pilares, surgiu o conceito de esbeltez limite (λ_1) considerando o material elástico-linear, de forma que os efeitos de 2ª de ordem começam a causar uma diminuição da capacidade resistente do pilar (SCADELAI, PINHEIRO, 2007). Portanto os esforços locais de 2ª ordem podem ser desprezados quando o índice de esbeltez (λ) for menor que o valor-limite (λ_1) (ABNT NBR 6118: 2014).

Para um lance de um pilar, o índice de esbeltez necessita de sua geometria e das condições de vínculo nos seus extremos. A classificação dos pilares pode ser definida de acordo com os seus índices de esbeltez, como (KIMURA, 2010):

- a) $0 \leq \lambda \leq 40$ – Pilar pouco esbelto;
- b) $40 < \lambda \leq 90$ – Pilar esbelto;
- c) $90 < \lambda \leq 140$ – Pilar muito esbelto;
- d) $140 < \lambda \leq 200$ – Pilar excessivamente esbelto;
- e) $\lambda \geq 200$ – Não pode ser classificado com um pilar.

É essencial que o índice de esbeltez de um pilar seja menor ou igual a ($\lambda \leq 200$) (ABNT NBR 6118:2014). Somente em casos de postes solicitados por 10% da resistência do concreto é permitido um índice de esbeltez maior que ($\lambda \geq 200$) (BENDÔ, 2011).

2.6 Não-Linearidades

Os estudos das não-linearidade física e geométrica interferem no comportamento das estruturas. Essas interferências são analisadas de acordo com a relação entre momento e curvatura (SCADELAI, 2004).

A não linearidade é um vínculo entre duas variáveis que não existe proporcionalidade, vários diagramas relacionam as variáveis como força e deslocamento, tensão e deformação, e na maioria dessas análises as variáveis não são lineares (PINTO, 2017). Dessa forma as não-linearidades se dividem, dependendo do seu comportamento, em: não linearidade geométrica e não linearidade física.

2.6.1 Não-Linearidade Física

A linearidade física é referente ao comportamento do material. A formação e abertura de fissuras no concreto, ocasiona a perda de proporção entre tensão e deformação, assim sendo um dos fenômenos responsáveis pela resposta não-linear deste material (OLIVEIRA, 2007).

Quando a tensão é proporcional à deformação o comportamento do material é considerado linear, assim obedecendo a Lei de *Hooke*. Caso isso não ocorra o comportamento do material é considerado não-linear (BORGES, 1999).

O método do pilar-padrão com curvatura aproximada só pode ser utilizado em pilares que tenham o índice de esbeltez $\lambda \leq 90$ e a não linearidade física do concreto é considerada por meio de uma expressão aproximada da curvatura na seção crítica (ABNT NBR 6118: 2014).

O método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada só pode ser utilizado em pilares que tenham o índice de esbeltez $\lambda \leq 90$ e para a não linearidade física do concreto é preciso fazer uma consideração por meio de uma expressão aproximada da rigidez (ABNT NBR 6118: 2014).

2.6.2 Não-Linearidades Geométrica

Para se analisar os esforços solicitantes de uma peça ao longo de sua seção transversal é feito uma suposição que a estrutura está em uma posição indeformada (SANTOS, 1987). Dessa forma, os efeitos da não linearidade geométrica são derivados da verificação da estrutura em sua posição deformada (PINTO, 2017).

As não-linearidades geométricas estão relacionadas com a intensidade dos deslocamentos e deformações da estrutura, portanto deve-se considerar sempre que ocorrerem alterações significativas na geometria (OLIVEIRA, 2007).

As não-linearidades geométricas, em geral, podem ser desconsideradas quando a hipótese de poucos deslocamentos é considerada válida. No entanto, esse efeito, com deslocamento relativamente significativo, pode evidenciar os problemas de instabilidade ou a relação do esforço axial com os momentos fletores (SCADELAI, 2004).

Para o método do pilar-padrão com curvatura aproximada, de acordo com norma ABNT NBR 6118: 2014, é feita uma análise aproximada da não linearidade

geométrica. Para isso, deve-se considerar uma curva senoidal que representa a deformada da barra (pilar-padrão). Segundo Kimura (2010), o pilar-padrão é uma simplificação que permite que o estado final do ponto do equilíbrio do pilar seja uma curva senoidal. Para o método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada a não linearidade geométrica é idêntica ao método anterior (ABNT NBR 6118: 2014).

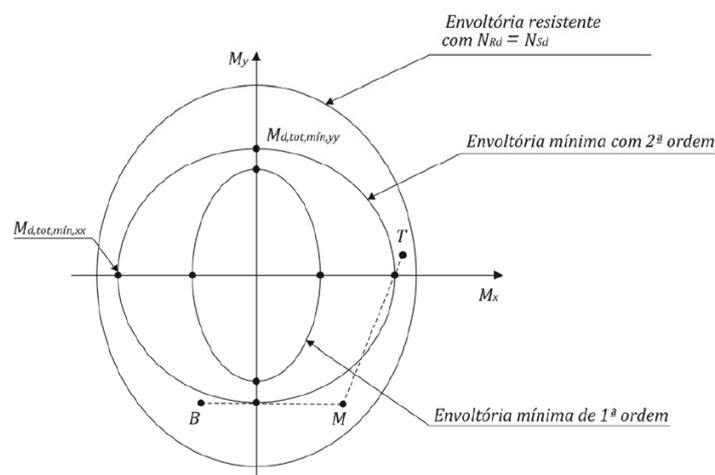
2.7 Envoltórias

As envoltórias mínimas solicitantes são utilizadas para verificar as imperfeições geométricas locais geradas na execução dos pilares. As envoltórias resistentes devem englobar as solicitações. Para o processo de dimensionamento de pilares, que estão submetidos à flexão oblíqua, é necessária uma verificação de envoltórias mínimas e verificação dos pontos solicitantes, que são as solicitações críticas que o pilar está submetido (topo, base e seção intermediária) (PINTO, 2017).

Os métodos pilar-padrão com rigidez κ aproximada e pilar-padrão com curvatura aproximada, verifica uma seção crítica do pilar (escolhida como seção intermediária). Dessa forma, devem-se inserir os momentos fletores de topo, base e da seção intermediária ao longo do pilar, e analisar se esses pontos se encontram dentro da envoltória resistente adotada, como mostra a figura 1 (PINTO, 2017).

Para definição da envoltória resistente é necessário a contribuição da seção bruta do concreto e da armadura pré-definida. Pode ser utilizado o cálculo direto pela integração das tensões resistentes da seção ou, para simplificar o processo de cálculo, utilizar ábacos de flexão composta normal (PINTO, 2017).

FIGURA 1 – Verificação dos momentos fletores solicitantes



Fonte: PINTO, 2017, p.130

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste tópico apresenta-se o procedimento realizado para dimensionar pilares de CAR por meio de envoltórias de momento.

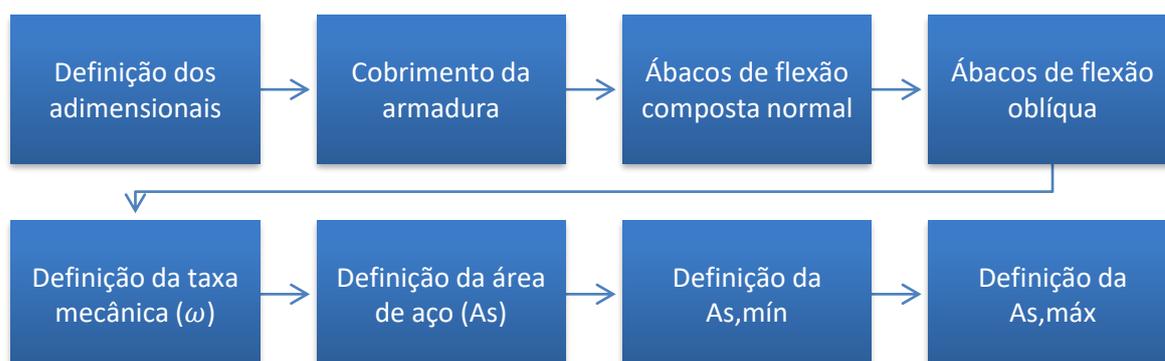
Foram utilizados pilares hipotéticos com parâmetros fixos: a seção do pilar, o comprimento do pilar e os momentos fletores nas direções x e y. A escolha da seção do pilar e do comprimento foi adotada por dimensões usuais, no qual a menor dimensão, de 19 cm, é possível ser embutida na parede, evitando que o pilar fique aparente. Para realizar o dimensionamento da seção intermediária foram utilizados o método do pilar-padrão com curvatura aproximada e o método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada.

Para o procedimento de análise do dimensionamento dos pilares foi utilizado o programa *Microsoft Excel*, facilitando o processo de cálculo gerando planilhas e representações gráficas, para assim fazer o comparativo modificando as características iniciais dos pilares, como resistência à compressão do concreto e outros parâmetros de interesse.

3.1 Processo de dimensionamento

Os ábacos mais utilizados para dimensionar pilares são os de flexão composta normal, dos autores Venturini, Rodrigues (1987) e de flexão oblíqua, dos autores Pinheiro; Baraldi; Porem (2009), porém esses ábacos só podem ser utilizados para concretos do grupo I. Para concretos de alta resistência, que estão no grupo II, é necessário utilizar os ábacos criados por Escoda (2019). A Figura 2 mostra as principais etapas que devem ser seguidas no processo de dimensionamento.

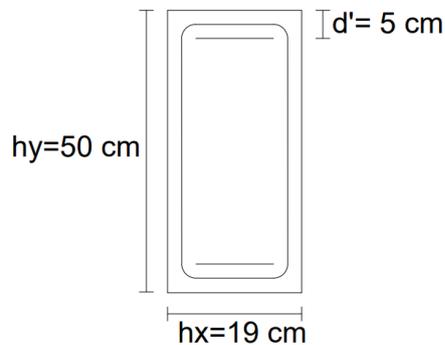
FIGURA 2 – Fluxograma: Processo de dimensionamento de um pilar



Fonte: Elaborado pelo autor

Foi estabelecido o arranjo de armadura feita com 2 linhas de barras de aço CA-50, distribuídas em duas camadas no interior da seção de concreto, como mostra a figura 3, sendo h_x a menor dimensão e h_y a maior dimensão do pilar.

FIGURA 3 – Arranjo da armadura



Fonte: Elaborado pelo autor

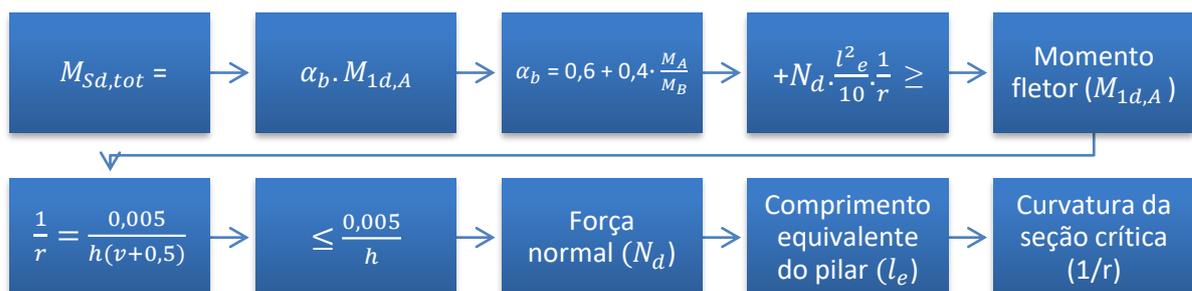
Para realizar o dimensionamento dos pilares foi utilizado os seguintes dados:

- Seção do pilar: 19 cm x 50 cm;
- Concretos: C55, C70 e C90, aço CA-50;
- Comprimento do pilar: 450 cm, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$;
- Momentos fletores na direção x: $M_A = 70 \text{ kN} \cdot \text{m}$ e $M_B = -40 \text{ kN} \cdot \text{m}$;
- Momentos fletores na direção y: $M_A = -60 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_b = -50 \text{ kN} \cdot \text{m}$;
- Força normal solicitante de cálculo: $N_{sd} = 1000 \text{ kN}$, $N_{sd} = 1500 \text{ kN}$, $N_{sd} = 2000 \text{ kN}$, $N_{sd} = 2500 \text{ kN}$.

3.1.2 Ponto de solitação central do pilar

O fluxograma da figura 4 apresenta as etapas necessárias para calcular a seção crítica do pilar pelo método do pilar-padrão com curvatura aproximada.

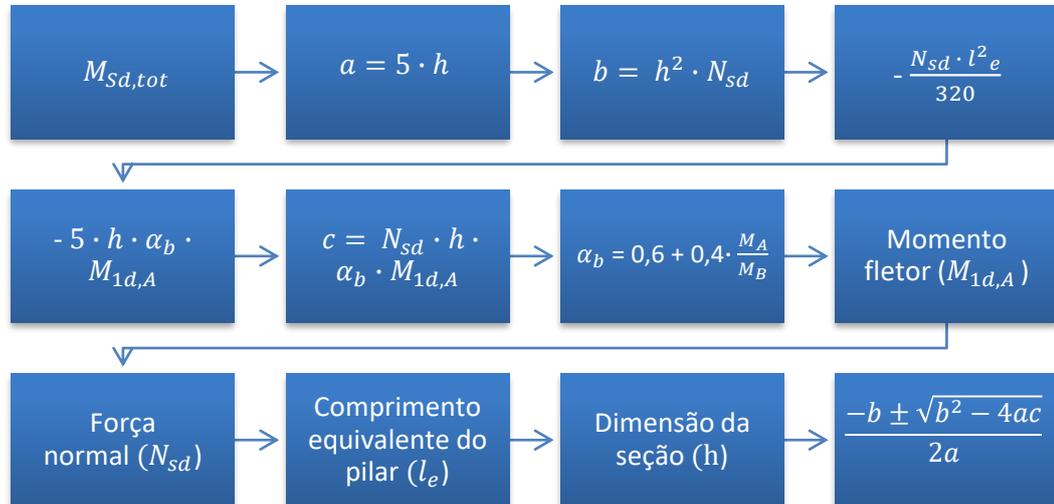
FIGURA 4 – Fluxograma: Método do pilar-padrão com curvatura aproximada



Fonte: Elaborado pelo autor

O fluxograma da figura 5 apresenta as etapas necessárias para calcular a seção crítica do pilar pelo método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada.

FIGURA 5 – Fluxograma: Método do pilar-padrão com rigidez κ aproximada

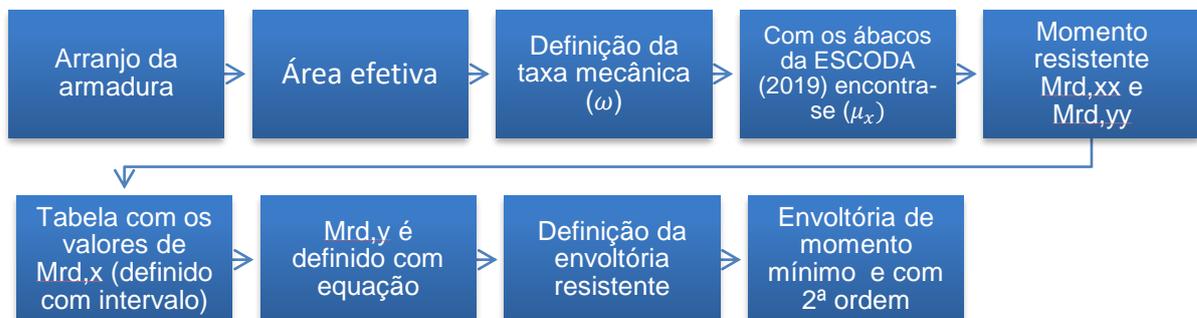


Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.3 Envoltórias

Para determinar o traçado da envoltória é necessário definir alguns pontos para gerar as curvas. Essas curvas representam os esforços máximos suportados pela seção do pilar. O cálculo envolve a contribuição de cada componente da seção, sendo esses componentes: a área de concreto comprimido e linhas de armadura, em tração ou compressão. Dessa forma é preciso conhecer a distribuição dos componentes e da taxa de armadura da seção para a elaboração dessa envoltória de acordo com as etapas apresentadas na figura 6.

FIGURA 6 – Fluxograma: Processo de dimensionamento das envoltórias



Fonte: Elaborado pelo autor

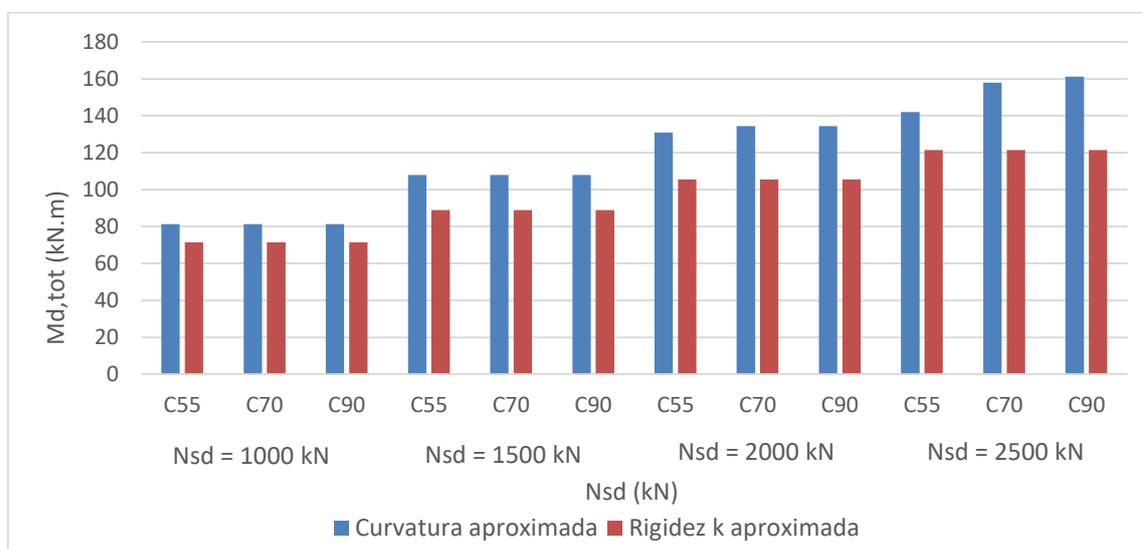
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após definir os dados necessários e executar a marcha de cálculo com o auxílio do programa *Microsoft Excel*, obteve-se os resultados para os concretos (C55, C70, C90).

4.1 Cenário inicial: Dimensionamento com ábacos

Com o dimensionamento realizado para os métodos pilar-padrão com curvatura aproximada e pilar-padrão com rigidez κ aproximada obteve-se os resultados apresentado nas figuras 7, 8 e 9. Na figura 7 foi analisado o momento fletor no eixo x, pois ele está sofrendo efeitos de 2ª ordem apresentando momentos fletores totais de maior intensidade em relação ao eixo y.

FIGURA 7 – Comparativo dos momentos fletores totais entre os métodos pilar-padrão com curvatura aproximada e pilar-padrão com rigidez κ aproximada – Eixo x



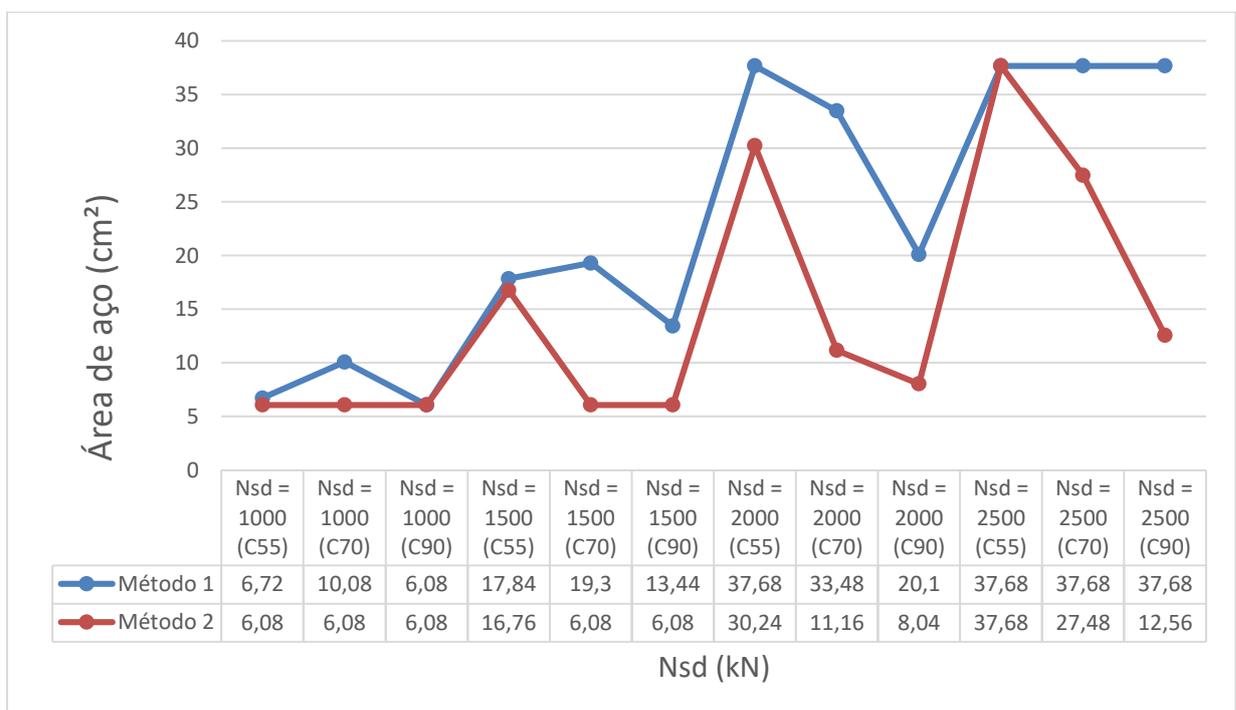
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a figura 7, nota-se que o método pilar-padrão com curvatura aproximada apresenta momentos fletores maiores que o método pilar-padrão com rigidez κ aproximada na direção x. Essa diferença de momentos fletores totais acontece porque o método pilar-padrão com curvatura aproximada não apresenta refinamento para a análise em 2ª ordem.

Para o método pilar-padrão com rigidez κ aproximada os momentos fletores totais são constantes para cada concreto, aumentando de acordo com N_{sd} . Isso ocorre porque a resistência característica (f_{ck}) não influencia nos cálculos dos momentos fletores totais.

Já para o método pilar-padrão com curvatura aproximada, os momentos fletores totais são constantes para todos os tipos de concretos para N_{sd} de valores de 1000 kN e 1500 kN, isso pode ser explicado, pois foi utilizado o mesmo valor da curvatura da seção crítica nesses casos. Já nos casos de N_{sd} com valores de 2000 kN e 2500 kN, há variações nos valores dos momentos fletores totais, pois a curvatura da seção crítica sofre modificações pertinentes a cada caso.

FIGURA 8 – Comparativo da área de aço dimensionada entre os métodos pilar-padrão com curvatura aproximada e pilar-padrão com rigidez κ aproximada



Fonte: Elaborado pelo autor

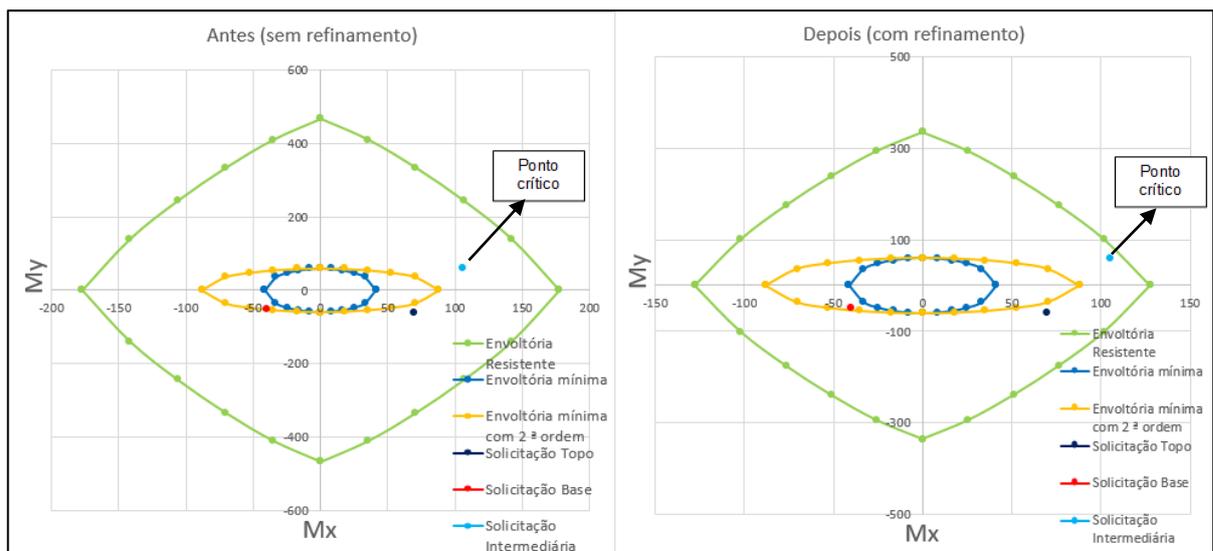
Observando o gráfico da figura 8 nota-se que, o método pilar-padrão com curvatura aproximada (método 1) utiliza menor área de aço com aumento da resistência característica (f_{ck}) do concreto. Porém, para N_{sd} de valor de 2500 kN, independente da resistência característica (f_{ck}) do concreto, foi dimensionada a mesma área de aço, calculada como sendo a máxima área possível de ser inserida no pilar. Percebe-se, portanto, que a taxa de armadura é influenciada pela resistência característica do concreto, pelos adimensionais e pelo tipo de ábaco.

Para o método pilar-padrão com rigidez κ aproximada (método 2), observou-se que o concreto que utiliza mais área de aço é o C55. Esse fato pode ser explicado pois ele apresenta taxa de armadura maior que os outros concretos. Porém os três concretos utilizaram a mesma área de aço para N_{sd} de valor de 1000 kN, já que apresentam uma taxa de armadura próxima.

4.2 Refinamento dos resultados

Ao analisar as envoltórias resultantes dos dimensionamentos nota-se que alguns concretos ficaram superdimensionados, como o caso do concreto C55 para N_{sd} de valor de 2000 kN, conforme mostra o antes e depois da figura 9.

FIGURA 9 – Envoltória resistente, envoltórias mínimas e solicitações antes e depois do refinamento



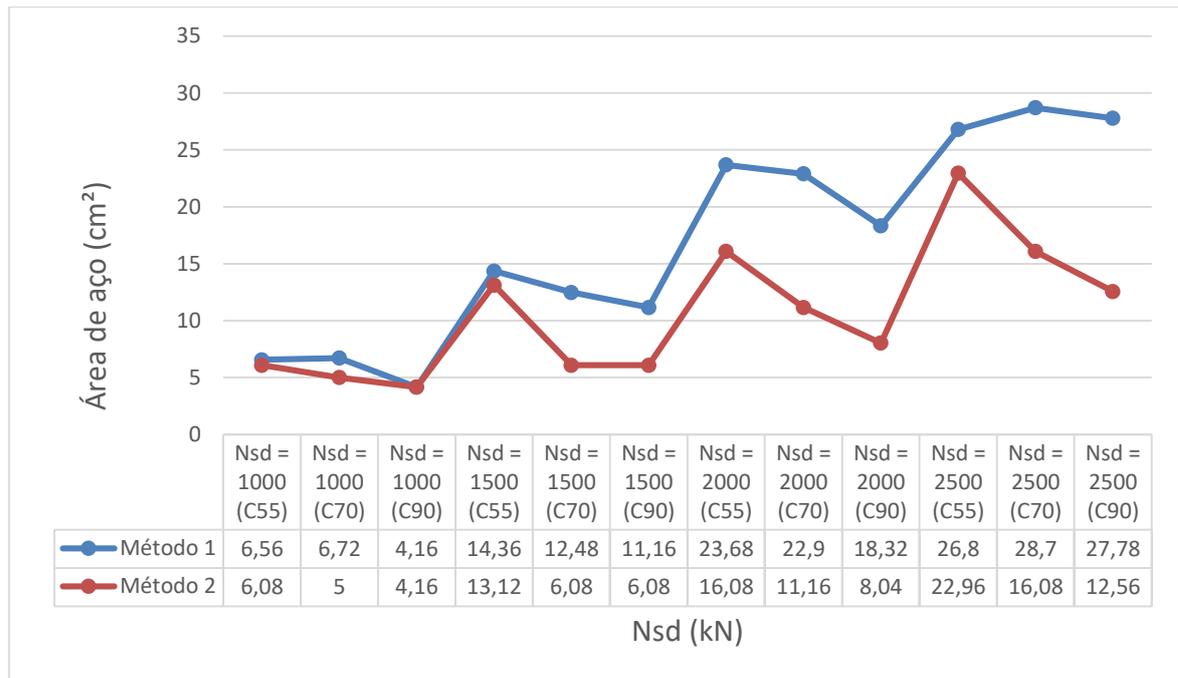
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o antes (sem refinamento) da figura 9 nota-se que o ponto de solicitação crítica (solicitação da seção intermediária) está dentro da envoltória resistente, portanto, a armadura calculada resiste as solicitações. Porém, o ponto crítico (solicitação da seção intermediária) está longe da envoltória resistente, mostrando que a armadura está superdimensionada, apresentando uma taxa de armadura maior que a necessária.

Esse fato ocorre porque os ábacos utilizados para o pré-dimensionamento são para concreto usuais (C20 a C50). Portanto, foi realizado um refinamento manual do dimensionamento por meio das envoltórias, testando as taxas de armaduras até

encontrar resultados condizentes próximos das envoltórias resistentes como mostra o depois (com refinamento) da figura 9. Após o refinamento obteve-se a área de aço apresentada na figura 10.

FIGURA 10 – Comparativo da área de aço entre os métodos pilar-padrão com curvatura aproximada e pilar-padrão com rigidez κ aproximada após o refinamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Após realizar o refinamento da taxa de armadura, como apresentado na figura 10, foi possível obter uma área de aço menor do que o cenário inicial. Mesmo após o refinamento, o método pilar-padrão com rigidez κ aproximada (método 2) apresenta ser mais eficiente que o método pilar-padrão com curvatura aproximada (método 1). Após o refinamento ficou evidente que, com aumento da resistência característica (f_{ck}) do concreto, ocorre a diminuição da área de aço.

5 CONCLUSÃO

Após analisar os dados obtidos com o processo de dimensionamento para cada um dos concretos e fazendo o comparativo entre os métodos, conclui-se que o método pilar-padrão com rigidez κ aproximada apresenta área de aço calculada menor que o método pilar-padrão com curvatura aproximada devido ao refinamento próprio do método para computar os efeitos de 2ª ordem.

Pode-se perceber essa diminuição da área de aço quando é feito o comparativo percentual entre os dois métodos, conforme apresentado na tabela 1, no qual o C70 para N_{sd} de valor de 1500 kN apresentou maior redução (68,50%) em relação ao método pilar-padrão com curvatura aproximada (método 1).

TABELA 1 – Redução percentual da área de aço do método pilar-padrão com rigidez κ aproximada (método 2) em relação método pilar-padrão com curvatura aproximada (método 1)

	C55 (método 1; método 2)	C70 (método 1; método 2)	C90 (método 1; método 2)	C55 redução (%)	C70 redução (%)	C90 redução (%)
A_s (cm^2) N_{sd} (1000 kN)	(6,72; 6,08)	(10,08; 6,08)	(6,08; 6,08)	9,5%	39,7%	0,0%
A_s (cm^2) N_{sd} (1500 kN)	(17,84; 16,76)	(19,3; 6,08)	(13,44; 6,08)	6,1%	68,5%	54,8%
A_s (cm^2) N_{sd} (2000 kN)	(37,68; 30,24)	(33,48; 11,16)	(20,1; 8,04)	19,7%	66,7%	60,0%
A_s (cm^2) N_{sd} (2500 kN)	(37,68; 37,68)	(37,68; 27,48)	(37,68; 12,56)	0,0%	27,1%	66,7%

Fonte: Elaborado pelo autor

Porém o dimensionamento apresentando neste trabalho não se mostrou eficiente, mesmo que o método pilar-padrão com rigidez κ aproximada apresente área de aço menor quando comparado com o método pilar-padrão com curvatura aproximada. Foi possível perceber, por meio das envoltórias, que houve superdimensionamento, ou seja, foi calculada uma área de aço maior que a necessária para suportar as solicitações aplicadas. Isso pode ser explicado porque os ábacos utilizados para o pré-dimensionamento foram elaborados para concretos até 50Mpa, mesmo sendo feito as correções da taxa de armadura com os ábacos para concretos de alta resistência da Escoda (2019).

Uma forma de corrigir essa área de aço, é por meio da análise das envoltórias resistentes. Essa análise é realizada de forma manual, testando as taxas de armaduras até encontrar resultados condizentes com os pontos solicitantes próximos das envoltórias resistentes.

Pode-se concluir que, com o aumento da resistência característica (f_{ck}) do concreto, ocorre a diminuição da área de aço, como mostra a tabela 2, para o método pilar-padrão com rigidez κ aproximada. Portanto os concretos de alta resistência necessitam de baixa área de aço, se mostrando eficaz para uso em pilares.

TABELA 2 – Redução percentual da área de aço com o aumento da resistência característica (f_{ck}) do concreto

	C55	C70	C90	C55 - C70 redução (%)	C70 - C90 redução (%)
A_s (cm^2) N_{sd} (1000 kN)	6,08	5	4,16	17,8%	16,8%
A_s (cm^2) N_{sd} (1500 kN)	13,12	6,08	6,08	53,7%	0,0%
A_s (cm^2) N_{sd} (2000 kN)	16,08	11,16	8,04	30,6%	28,0%
A_s (cm^2) N_{sd} (2500 kN)	22,96	16,08	12,56	30,0%	21,9%

Fonte: Elaborado pelo autor

Porém, para que esse dimensionamento seja eficiente e apresente valores dentro da realidade, são necessários ábacos próprios para os concretos de alta resistência com flexão composta oblíqua, que é a amostra de análise deste trabalho.

Neste sentido, como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a elaboração de ábacos para concretos de altas resistências com flexão composta oblíqua, para que os dimensionamentos de pilares, utilizando concretos de alta resistência, seja feito de forma coerente.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. R. M. **Dimensionamento ótimo de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão normal utilizando programação matemática e algoritmos genéticos**. 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos do Goytacazes, 2013. Disponível em:< <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2015/09/Laura-Rebel-Moreira-Alves.compressed.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2020.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. 2000. 14 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em:< <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/159041>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:2014** - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT: 2014.

_____. **ABNT NBR 8953:2015** - Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, ABNT: 2009.

BENDÔ, N. P. **Geração de ábacos para dimensionamento de seções de pilares solicitadas por flexão composta**. 2011. 46 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em:< http://www.deecc.ufc.br/Download/Projeto_de_Graduacao/2011/Nestor_Bendo_Geracao%20de%20abacos%20para%20dimensionamento%20de%20secoes%20de%20pilares%20solicitadas%20por%20flexao%20composta.pdf>. Acesso em: 16 out. 2019.

BORGES, A. C. L. **Análise de pilares esbeltos de concreto armado solicitados a flexo-compressão oblíqua**. 1999. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em:< http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1999ME_AnaClaudiaLeaoBorges.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2020.

ESCODA, A. S. M. P. **Geração de ábacos de flexão composta normal utilizando concreto de alta resistência com seção retangular**. 2018. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário UNIFAFIBE, Bebedouro, 2019.

JACOMASSI, L M C. **Avaliação do Comportamento de Pilares de Concreto de Alta Resistência: Simulação Numérica Utilizando o Código de Cálculo CASTEM-2000**. 2008. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. Disponível

em:<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94537/jacomassi_lmc_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 mar. 2020.

KIMURA, A. E. **EE05 - Pilares**: Módulo EE05 - Pilares do curso de pós-graduação da FESP. São Paulo: FESP/ABECE/TQS, 2010. 272 p.

LIMA, J. S. **Verificações da punção e da estabilidade global em edifícios de concreto: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas**. 2001. 249 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em:<http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2001ME_JulianaSoaresLima.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2020

NASCIMENTO, P. P. **Análise experimental de pilares de concreto armado submetido à flexo-compressão, reforçados com concreto auto-adensável e conectores**. 2009. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Área de Concentração em Estruturas e Materiais de Construção—Universidade Federal de Goiás, 2009. Disponível em <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/679/1/dissertacao%20poliana%20paula%20nascimento.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2020.

OLIVEIRA, D.M. **Estudo dos processos aproximados utilizados para a consideração das não-linearidades física e geométrica na análise global das estruturas de concreto armado**. 2007. 297 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. Disponível em:<<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/LMCA-7E6EYW/1/tesefinal.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2020.

OLIVEIRA, F. E. M. **Projeto de edifícios em estrutura metálica: efeitos de 2ª ordem**. 2013. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Porto, Porto, 2013. Disponível em:<<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/67879/2/26727.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

PAIVA, N. M. B. **Pilares de concreto de alta resistência com seção transversal retangular solicitante à compressão simples**. 1994. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994. Disponível em:<http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258044/1/Paiva_NadjaraMarisBarroso_M.pdf>. Acesso em: 16 out. 2019.

PINHEIRO, L. M; BARALDI, L. T; POREM, M. E. **Estruturas de concreto: Ábacos para flexão oblíqua**. 2009. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em <<file:///D:/engenharia%20civil%202020.1/arquivos%20com%20tema%20tcc/24%20Abacos%20flexao%20obliqua.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

PINTO, V. S. **Dimensionamento de pilares de concreto com seção transversal retangular usando envoltórias de momentos**. 2017. 312 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2017ME_ViniciusSlompoPinto.pdf> . Acesso em: 10 set. 2019.

QUEIROGA, M. V. M. **Análise experimental de pilares de concreto de alto desempenho submetido à compressão simples**. 1999. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São de Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1999ME_MarcosViniciosMendoncadeQueiroga.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2020.

RAMOS, R. F. **Análise experimental de pilares de concreto armado sob ação centrada com resistência do concreto de 25 MPa**. 2001. 247 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-12082016-115720/publico/Dissert_Ramos_RicardoF.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2020.

SANTOS, L. M. **Estado-limite último de instabilidade**. M-03/87. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1987. 112 p.

SCADELAI, A. M; PINHEIRO, L. M. Pilares. In: PINHEIRO, L M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos, 2007. Cap. 16. p. 219-250. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2020.

SCADELAI, M. A. **Dimensionamento de pilares de acordo com a NBR 6118:2003**. 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/2004ME_MuriloAlessandroScadelai.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2020.

SILVA, R. G. L. **Avaliação dos efeitos de 2ª ordem em edifícios de aço utilizando métodos aproximados e análise rigorosa**. 2004. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais. 2004. Disponível em <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/FACO-6AYMWD>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

VENTURINI, W. S.; RODRIGUES, R. O. **Dimensionamento de peças retangulares de concreto armado solicitadas à flexão reta**: Material Bibliográfico utilizado nas disciplinas de concreto armado pelo Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos: Departamento de Engenharia de São Carlos, 1987. 131 p.